

机械故障的诊断 与情况监测

[英] R. A. 柯拉科特

MECHANICAL
FAULT DIAGNOSIS
and Condition Monitoring

机械工业出版社

机械故障的诊断与情况监测

〔英〕 R.A. 柯拉科特

孙维东 麦松江 邓续魁 贾志隆 朱朋飞 译

黄昭毅 校



机械工业出版社

本书系统地汇集了有关设备故障的诊断与监测的最新技术，共分十五章。书中首先分析故障的类型与发生的原因；进而分别介绍各种监测技术和系统，如振动分析、声音监测、分离频率、污染分析、光谱测定油分析、性能趋向监测等，并研究了在各种情况下选择不同技术措施的准则；还讨论了数据的处理和可靠性科学问题，并提供一些决策性的数据。

本书可供机械制造、航空、造船等工业和发电站的工程技术人员参考。

《MECHANICAL FAULT DIAGNOSIS and Condition Monitoring》

R. A. Collacott

Chapman and Hall, London, 1977.

* * *

机械故障的诊断与情况监测

〔英〕 R. A. 柯拉科特 著

孙维东 麦松江 邓续魁 贾志隆 朱朋飞 译

黄昭毅 校

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号）

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $850 \times 1168^{1/32}$ · 印张 $17^{7/8}$ · 字数 472 千字

1983年5月北京第一版·1986年9月北京第二次印刷

印数 16,301-18,900 · 定价 4.40 元

*

统一书号：15033·5519

前 言

虽然最完善的故障诊断和情况监测系统起源于航空及航天工业和核能工业，但这种应用决不只限于这一“高级技术”领域。目前，在多数工厂里的现代化机械是如此复杂和昂贵，致使机械员们感到靠诸如识别声音“信息”的变化来检测故障已日益困难，而且很少工厂能够负担得了经常“拆卸检查”的巨大耗费。因此，用预报警装置去防止突然发生破坏性故障的情况在逐步增加。

本书对故障诊断和情况监测装置作了首次协调性的汇编。书中分三步进行论述。前面几章论及促使装置损坏和可能随之而来的故障扩大的那些情况。书的中间几章研究了各种监测技术，并讨论了在各种情况下选择不同技术的准则。最后几章是对监测得出的数据信号说明和关于可靠性科学及概率论数学提出指导性意见，因而提供了在业务管理上能够起作用的决策性数据。

由于建立了英国机械保健监测组织，我已了解到在这个领域内有很广泛的工业上的好处。我希望本书将对设备工程师和高级行政管理人员在迅速得到最符合他们需要的设备的参考资料方面有所帮助。本书对于那些在复杂机械的制造和维修方面有特殊兴趣的机械工程师和控制工程师也应有所裨益。

R. A. 柯拉科特

1976 年

目 录

前言

第一章 故障类型、故障的研究及故障的发生..... 1

1.1 引言 1

1.2 系统故障和部件故障 1

1.3 故障的确定 2

1.4 故障分类 2

1.5 故障的类型 4

1.6 故障的研究 6

1.7 故障情况的研究 (全系统的研究)..... 7

1.8 破坏性事故的人为因素16

第二章 故障发生的原因..... 19

2.1 引言19

2.2 维护中的故障19

2.3 疲劳21

2.4 过度变形26

2.5 磨损31

2.6 腐蚀37

2.7 造成堵塞的泥渣40

2.8 冷却系统中的堵塞40

2.9 设计、制造和装配上的故障原因41

第三章 故障探测传感器..... 46

3.1 引言46

3.2 污染的监测45

3.3 腐蚀的监测46

3.4 力的监测48

3.5 漏气监测51

3.6 空气污染的监测51

VI

3.7	流体污染的监测	57
3.8	非破坏性的试验技术	59
3.9	光学检查	62
3.10	温度的传感	62
3.11	微粒的测试	65
3.12	接近式监测器	66
3.13	声音的监听	68
3.14	振动传感器	69
3.15	遥测技术	75
第四章	数据处理与分析	83
4.1	引言	83
4.2	傅里叶分析法	85
4.3	频率分析技术	94
4.4	导出函数	95
第五章	振动分析	107
5.1	引言	107
5.2	振动——简谐运动概念	110
5.3	自运转系统的振动信号	112
5.4	振动监测设备	114
5.5	系统监测器和振动极限检测器	120
5.6	振动监测经验	126
5.7	临界振平	143
第六章	声音的监测	152
6.1	引言	152
6.2	声音的频率	156
6.3	声音响度测量	163
6.4	声功率	165
6.5	声音测量	165
6.6	磁带录音机	166
6.7	音平表	169
6.8	声音分析器	170
6.9	声音信号的数据处理	170

6.10 声音监测	170
第七章 离散频率	194
7.1 引言	194
7.2 简单振动	198
7.3 杆的横向振动——近似频率计算	202
7.4 更精确的计算——谐波计算	206
7.5 飞轮支承轴的扭转振荡	209
7.6 皮带传动	219
7.7 船舶传动轴系的绕转	220
7.8 齿轮的激发	225
7.9 滚动轴承	231
7.10 叶片的振动	235
7.11 凸轮机构的振动	241
第八章 污染分析	246
8.1 引言	246
8.2 所使用的润滑油的污染	246
8.3 承载液体的质量下降	250
8.4 污染监测方法（磨损过程）	252
8.5 油质量下降的分析	254
8.6 润滑油中的磨料微粒	255
8.7 轴承中的磨料微粒	256
8.8 液压系统中的磨料微粒	257
8.9 溶解气体的故障监测	262
第九章 光谱测定油分析程序（SOAP）和其他污 染监测技术	267
9.1 引言	267
9.2 光谱测定油分析程序	267
9.3 磁性碎屑探测器	279
9.4 “铁粉记录图”的微粒沉淀	290
9.5 材料试验标准控制仪器（STM Control Kit）	295
9.6 在用油的吸墨纸试验	295
9.7 薄层色层分离法	296

9.8	电容性的油碎片的监测器	297
9.9	污染的 X 射线荧光探测 (XRF)	297
9.10	X 射线光电子光谱测定法	298
9.11	微粒的分类	30 ⁰
第十章	性能趋向的监测	306
10.1	原始监测—性能监测	306
10.2	主要的和次要的性能参数	311
10.3	性能趋向分析	320
10.4	涡轮气体通道性能监测的热力学	323
10.5	汽轮机性能分析	336
10.6	性能监测的实例的研究	338
10.7	性能监测系统	349
第十一章	静态试验	358
11.1	引言	358
11.2	直观试验	358
11.3	液体渗透检查	365
11.4	热探法	367
11.5	X 射线照相术	367
11.6	声能学	372
11.7	超声学	373
11.8	应力波发射	378
11.9	磁性试验法	381
11.10	电无损探伤技术	386
11.11	涡流试验	387
11.12	无损探伤的选择	387
第十二章	运行中的监测系统	397
12.1	引言	397
12.2	船舶监测系统	397
12.3	船舶情况监测的需要	400
12.4	船用柴油机的监测	402
12.5	船舶轮机的监测系统	411
12.6	船舶振动的监测	415

12.7 光谱测定船用油的分析程序	416
12.8 完整性监测的检验	417
12.9 飞机的情况监测	419
12.10 发电装置的情况监测	430
12.11 汽车的诊断装置	430
12.12 系统故障监测器的选择	435
第十三章 故障分析计划和系统可用性	440
13.1 引言	440
13.2 有效度	461
13.3 故障预测和可靠性的确定	468
13.4 危险率曲线	474
13.5 复杂系统的可靠性——芒特·卡罗模拟	479
13.6 危险的化工设备——高度完整性保护系统 (HIPS)	480
第十四章 可靠性和故障的概念	483
14.1 引言	483
14.2 可靠性及故障的概率	484
14.3 故障的模式——指数曲线分布	490
14.4 负载及强度的统计分布	495
14.5 可靠性保证——BS 9000 系统	498
第十五章 可靠性数据的来源	500
15.1 引言	500
15.2 系统可靠性服务部 (SRS)	502
15.3 故障数据	512
15.4 环境对仪器的故障率的影响	519
15.5 故障数据——可信度	520
英汉名词对照	523

第一章 故障类型、故障的研究及故障的发生

1.1 引言

在英国标准维修词汇中，故障定义为“一台装置在它应达到的功能上丧失了能力”。这样的故障范畴可包括如下内容：

- (1) 引起系统立即丧失其功能的破坏性故障；
- (2) 与降低设备性能相联的性能上的故障；
- (3) 即使设备当时正在生产规定的产品，而当操作者蓄意使设备脱离运转时。

1.2 系统故障和部件故障

任何特殊的系统故障或部件故障所影响于“正常作用”或“完成使命”的程度与设备功能有关。一台泵的故障在机床上和在飞机或太空航船上有很大的差别。

当研究船舶机械的故障时，布立基兹 (Bridges)^[1]指出，某些系统和设备仅需要完成其部分使命。如果，当船舶在到达主要目的地的航程中，而在其完成主要任务所必需的系统或设备发生故障，并且在完成航程前不能修理，那末，就认为这一任务已经失败。

典型地考虑一下渔轮的任务。渔轮有两根轴，在捕鱼时两根轴都同时要用，但在前往或离开捕鱼区时仅需用一根轴。因此，在渔船前往捕鱼区的过程中，假如其驱动设备的一根轴组损坏，如在捕鱼前能修好，任务还能继续执行。然而，如故障不能修复的话。那末，所承担的全部任务最后还是完不成。同样，如在捕鱼阶段时，驱动系统发生了故障，则此任务也被认为失败。

1.3 故障的确定

导致工厂或系统发生故障不能进行正常程序和计划管理的事件是非常复杂的。根据原子能工厂运行的典型规划纲要可包括以下步骤：

- (1) 工厂特点的知识；
- (2) 稳定状态或瞬间状态操作方法的分析；
- (3) 全厂参数安全界限的确立；
- (4) 有用信号的考虑；
- (5) 控制跳闸装置的调整（考虑到仪器的不准确）；
- (6) 操作闭锁机构的设计；
- (7) 自动控制和手动操作的选用；
- (8) 保护系统的测量，包括（a）自动闭锁；（b）工厂运行的制约系统；（c）辅助保护应用系统的测量；
- (9) 根据保护系统的影响列出恢复原状的方法；
- (10) 保护系统操作规程的确立。

1.4 故障分类

“故障”或“缺陷”可根据设备丧失全面工作效能的程度，由不同角度来观察。诸如经济性能、安全性、工程复杂性、故障快慢、故障起因等方面都对故障的分类有影响。

1.4.1 工程上的故障分类

有两种不同性质的故障等级：

- (1) 间断性故障：只在很短的期间内，故障造成部件丧失某些功能，而在部件发生故障后立刻恢复它的全部运行标准；
- (2) 永久性故障：故障造成某些功能的丧失，直到部件的某些零件被更换后功能才能继续维持。

1.4.2 故障分类的等级

永久性故障可进一步细分为以下两类：

- (1) 完全性故障：完全丧失所需功能造成的故障（应该注

意，在一定情况下，所谓完全丧失功能是从广义而言，应随使用情况而定）；

（2）部分性故障：导致某些功能的丧失，但不会引起所需功能的全部丧失。

1.4.3 故障快慢的分类

完全性和部分性两种永久性故障可根据故障出现时的突发性进一步分为：

- （1）突发性故障：不能靠早期试验或测试来预测的故障；
- （2）渐发性故障：能通过早期试验或测试来预测的故障。

1.4.4 故障程度和故障快慢的分类

以上两种故障形式可结合起来作以下进一步的分类：

- （1）破坏性故障：既是突发性又是完全性的故障。
- （2）渐衰失效性故障：既是部分性又是渐发性故障。

1.4.5 故障原因的分类

根据故障发生的方式，可进一步分为：

（1）磨损性故障：故障归因于设备设计时意料之中的正常磨损过程；

（2）错用性故障：故障归因于应力的应用超过所述项目能力；

（3）固有的薄弱性故障：故障归因于系统或部件的设计或制造中其应力承受在规定能力范围内，而丧失其适用性。

1.4.6 危险故障的分类

可能出现的损坏（较大的或较小的故障）能分成两种主要的不测事故，即所谓危险性故障或安全性故障。

（1）危险性故障：（a）保护系统在需要动作时发生的故障；（b）机床造成损害工件和（或）操作者的故障；（c）牵引系统中的制动故障；

（2）安全性故障：（a）不需动作而保护系统动作造成的故障；（b）机床起动时的故障；（c）牵引系统中不需制动时而制动所造成的故障。

1.5 故障的类型

通过对系统和部件可靠性的研究，公认有三种故障类型，即由大卫斯 (Davies) [2] 所认为的、有关故障诊断的所谓早期致命性、偶发性及随时性故障。

1.5.1 早期致命性故障 (早期故障)

图 1.1 表示太空工程中的现实情况，其中规定了应力和强度的界限。在总体上，部件的质量在正常时应分布在设计点上，但有时会出现局部的“薄弱部件”，也即是有的强度在工作应力值以下。

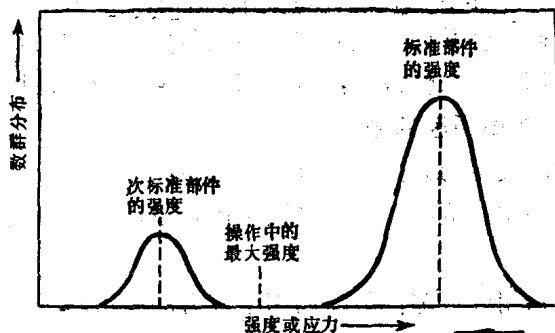


图1.1 早期致命性故障的概率

“强度”一词，在此用来表达质量是不够严谨的。这种问题的出现，是由于质量检查网中漏列的新的损坏类型，或由于装配方法导致不良结构。对于电子部件，往往出现在试验台设备的老化情况，当然，有关此类问题，也适用于大修后的发动机试验上。

1.5.2 偶发性故障

这些故障是基本工程问题，如图 1.2 所示，应力和强度间的界线规定相近（战斗时典型的飞行情况必须满足性能和重量上的需要）。部件在可以接受的质量低限时，可能有时处在应力高限上工作，因而部件失效，这里将是一条高斯分布曲线。有两种改进这

种情况的途径。首先，靠增大两项值的间距，即增大强度并降低应力；第二，靠降低各自曲线的标准偏差，即严格贴紧质量控制极限和限制设备的操作范围。

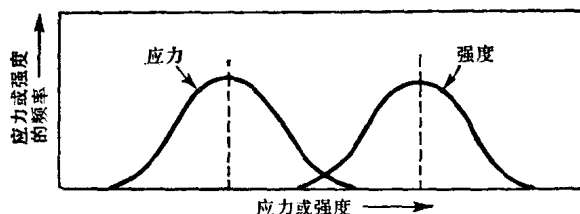


图1.2 偶发性故障的概率

1.5.3 随时性故障

两种实例示如图 1.3。曲线 A 是故障平均时间 O-M 的典型情况，它有正态分布曲线。因为标准偏差 (σ) 包括全部偏差的一定百分比，所以，使用寿命可表示为能够控制的允许出现的故障次数。例如，采用 3σ 时应该得到大约 98% 的成功。

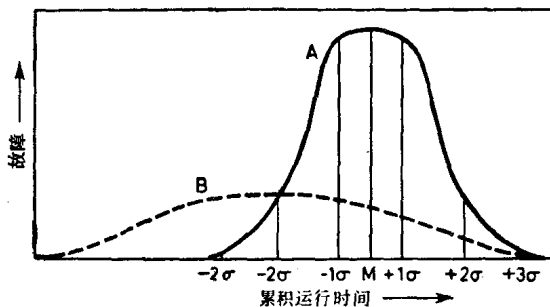


图1.3 随时性故障

实际上，曲线 B 所示情况是经常出现的。这是可称为真正的随时性，它有一条很宽的分布曲线，以致时间的控制成为无关紧要 and 过分的要求。因此，在确定寿命极限以前，应把实际的故障分析与分布曲线联系起来进行。

1.6 故障的研究

失事飞机的技术性研究，长期以来已被航空工业认为是从中获取故障原因必不可少的程序。《飞机事故研究手册》^[3]内不仅谈到推荐研究者应遵循的程序，而且也包括构成事故因素的研究，以及进一步研究的基础资料 and 不同类型结构故障的综合解释。

不论故障的代价如何，也很少考虑由非工业性组织去从事工程上的故障研究。如劳埃德（Lloyd）船舶年鉴上及英国蒸汽锅炉与电气保险公司的执照协会，积累有丰富的经验，但是这些经验也是很少有通用性的。

在美国，产品责任法规已规定了必须分析故障并监测产品的可靠性。在英国，乔斯特（Jost）的报告^[4]导致摩擦技术中心的建立，该组织的很多活动与故障诊断和预防故障再度发生的业务有关。

1.6.1 故障研究的原则

城区大学^[5]的麦约（Meyer）教授提出了以下故障研究程序的主要原则。

（1）研究工作开始得越早，确定故障真正原因或故障的机会越大；

（2）不得销毁证据，不得扰乱和清理故障和事故现场，尤其不得接触故障的破裂表面或离故障处最近的周围环境；

（3）现场证据的变动，只有通过提供文件（报告书、记述单、照片）以后才能进行。要确保拆散的部件能够单独鉴定、重新装配和在相互关系上正确复位。应小心触摸和包装证物，不得造成偶然的刮痕、擦伤、压伤或变形。

（4）不得排除周围事物和环境情况而只集中注意于故障破裂处。应从周围证据获得大量的资料后，再逐步接近故障原点。局部故障的起因和接近原点的区域，可能仅仅是由其他原因而决定的主要故障的仅有的诱因。一系列起因的巧合，比例外的起因更

有规律性。

(5) 不得忆测或轻意得出结论。要收集全部事实真相，然后排除非本质性的东西。要依靠故障的现场照片、笔记及草图，而不依靠记忆。不能由于故障是显而易见，而要把其他所有可能性都排除了，才能确立故障的起因。

(6) 设法从客观证据中及访问中获得真实的历史资料。不得在欠考虑的情况下发表任何声明或表示任何意见，特别是不要表示你自己的意见。别人的教训、判断和决定都是易犯错误的，而且是属于下意识的成见。

1.7 故障情况的研究（全系统的研究）

自然现象的歪曲，甚至会妨碍充分和完整地听取典型故障情况，但是能从已经验明的故障和损坏现象的观察中，得到某些指导。很多严重的故障（但不是全部）是由很不重要的原因引起的，如少拧一个螺栓、漏加一个垫圈、用错误方法装配部件、草率地操作一个阀门。

1.7.1 美国军用直升飞机的故障

在 1969 年财政年度中，FY 69 型直升飞机，在世界范围内的事故故障原因是由下列项目造成的^[6]：

空勤及地勤人员的错误占 49.5%（空勤及地勤人员连续地处理紧急情况造成故障）；

材料故障 23.6%；

零件及部件失灵 1.7%；

其他 16.8%（非空勤及地勤的人员全员训练不足；不适当的场地面积、飞机控制设备的设计、测定方位等）。

从材料或部件的事故中引起的技术性故障如下：

(1) 发动机故障：主要原因为轴流式涡轮机的第 4 级压缩机损坏；

(2) 发动机传动系统的故障：发动机和主旋翼或（与）尾翼螺旋桨间轴上的弹性联轴节不能稳定地旋转并发生严重位移；

(3) 驱动轴的联轴节或驱动轴支架的故障：低劣的设计促成很多零件和这一系统的可靠性低，加上不适当的润滑，导致联轴节和支架的故障。零件装配不正确造成油流被阻；

(4) 旋翼系统的故障：主旋翼和尾翼螺旋桨叶片间的界面由于高度应力集中而造成灾难性的故障；

(5) 尾翼螺旋桨中心轮毂固定轭的故障：在 32 项死亡事故中有 29 起是由于固定轭螺纹端抗拉力不够引起故障。故障出现在螺纹根部和“保险销”孔截面应力高度集中的区域；

(6) 主旋翼翼梁的疲劳性故障：叶片翼梁与主旋翼轮毂的结合处由于应力高度集中以及在螺栓和套箍接触面上含有金属的（钻孔切削）碎屑造成故障；

(7) 液压系统和飞行控制装置的故障：这些故障是由下列原因引起：(a) 液压管路故障；(b) 飞行控制推拉轴管故障；(c) 一次和二次液压驱动装置的故障；

(8) 紧固件故障：最普遍的损失包括由于销钉的漏装，使螺栓上的槽顶螺帽松动，在某些情况下，当重复使用纤维质螺帽时，曾出现过纤维螺帽失去夹紧力的故障。

1.7.2 建筑物

混凝土建筑物的故障是难于断言而且可由多种原因造成。据水泥及混凝土协会的瑞克思汗姆·斯普林(Wrexham Springs)，斯诺(Slough)、布克斯(Bucks)的调查，包括在图 1.4 所示的故障生成树表明，故障的主要原因是由于地震和地基下沉，而混凝土性能不稳定是起作用的因素。

1.7.3 船舶汽轮机

顿纳尔德 (Donald)^[7]认为，导致船舶汽轮机系统不可靠的典型原因是由于下列缘故：

锅炉	占 49%；
冷凝器和循环水泵	占 12%；
锅炉给水泵	占 11%；
汽轮机主机	占 7%；
所有其他原因	占 21%。